تشخیص آسیب چندگانه در سازه بااستفاده از روش آنتروپی موجک گسسته*

پژوهشی

میلاد آشورزاده مقری[۱] علی بیگلری فدافن[۲]

چکیده *مقایسهٔ داده‌های سازه در دوحالت آسیب‌ندیده و آسیب‌دیده یک روش معمول به‌منظور تشخیص آسیب در سازه است. براساس این پردازش مکان و شدت آسیب شناسایی می‌گردد. انتخاب الگوریتم مناسب به‌منظور انجام این مقایسه با دقت بالا و سرعت مناسب از اهمیت بالا یی در فرایند شناسایی آسیب برخوردار می‌باشد. در این مقاله با تعریف مفهوم آنتروپی موجک به‌منظور حفظ دقت و برمبنای تبدیل موجک گسسته به‌منظور حفظ سرعت، یک الگوریتم تشخیص به‌منظور شناسایی محل آسیب در سازه پیشنهاد شده‌است. استفاده از تعریف تبدیل موجک گسسته به‌همراه آنتروپی موجک، پایه الگوریتم شناسایی آسیب روش پیشنهادی را تشکیل می‌دهد. به‌منظور ارزیابی حساسیت روش پیشنهادی، از یک مدل عددی به‌منظور درنظر گرفتن سناریوهای گوناگون آسیب استفاده شده‌است. روش پیشنهادی، قابلیت شناسایی چند مکان آسیب براساس پردازش پاسخ رفتار دینامیکی سازه در اثر تجربهٔ زمین‌لرزه در سازه‌ای که رفتار واقعی اتصال در آن شبیه‌سازی شده‌است را دارا می‌باشد. روش پیشنهادی به‌عنوان یک روش مؤثر در شناسایی آسیب می‌تواند استفاده شود.*

واژه‌های کلیدی پایش سلامت سازه، شناسایی آسیب، تبدیل موجک گسسته، آنتروپی موجک نسبی، قاب سه‌بعدی.

Structures Multi-Damage Detection by Discrete Wavelet Entropy Method

M. Ashurzade Moghri A. Bigleri Fadafan

Abstract *Identification of infrastructure damage in the early stages is one of the most fundamental requirements through the maintenance process. In order to identify damages in the process of Structural Health Monitoring, numerous methods have been developed, including Neural Network (NN) Damage Identification Techniques, Time Series Damage Identification Techniques, Frequency Response Damage Identification Techniques, Force Spectrum Density Damage Identification Techniques, and Wavelet Damage Identification Techniques. The conventional structural health monitoring procedure depends on a comparison of undamaged primary structural data to the affected structural data. Comparative algorithms to indicate the location of damage based on the structural data has a significant effect on the structural health monitoring method performance. Therefore, a damage detection algorithm is the most important step in identifying damage in the structural health monitoring procedure. In this paper, a damage identification algorithm based on the relative wavelet entropy method is proposed for the structure. Using the definition of the discrete wavelet transform with wavelet entropy form the base of the proposed algorithm for damage detection to support the method efficiency. The proposed method is capable of identifying several sites of damage and is used as an effective method compared to other methods of damage detection.*

Key Word Structural Health Monitoring, Damage Detection, Discrete Wavelet Transform, Relative Wavelet Entropy, 3D frame.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۹/۲۲ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/٦/۲۱ از صفحه ۱ تا ١٦ می‌باشد .

(۱) دانشجوی کارشناسی ارشد عمران – سازه، دانشکدهٔ فنی مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان، گرگان.

(۲) نویسندهٔ مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی مهندسی گرگان، دانشگاه گلستان، گرگان. **Email:** Biglari.a@gmail.com

مقدمه

شناسایی آسیب در زیرساخت‌های عمرانی در مراحل ابتدایی شروع آسیب، یکی از اساسی‌ترین نیازها در فرایند نگهداری صحیح می‌باشد. به‌منظور شناسایی آسیب در فرایند پایش سلامت سازه‌ها، روش‌های بی‌شماری مورد بررسی قرار گرفته‌است از جمله این روش‌ها می‌توان به این موارد اشاره کرد؛ روش‌های شناسایی آسیب مبتنی‌بر شبکهٔ عصبی(Neural Network (NN)-Based Damage Detection Techniques) [1]، تکنیک‌های شناسایی آسیب مبتنی‌بر سری‌های زمانی (Time Series-Based Damage Detection Techniques)، روش‌های شناسایی آسیب مبتنی‌بر فیلتر کلمن (Kalman Filter-Based Damage Detection Techniques) [2]. روش‌های مبتنی‌بر خصوصیات شکل‌های مدی و خصوصیات رفتار دینامیکی سازه، تابع پاسخ فرکانسی، چگالی طیف نیرویی [2] و روش‌های مبتنی‌بر به‌کارگیری موجک‌ها [3].

در بررسی سیگنال‌های تصادفی، غیرایستا و غیرخطی تحلیل تبدیل موجک (Wavelet Transform (WT)) به‌عنوان یک روش شناسایی الگوی سیگنال در شناسایی آسیب‌های سازه‌ای به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌است [4, 5]. به‌صورت ویژه تبدیل موجک روش مناسب‌تری از تبدیل فوریه به‌منظور بررسی سیگنال‌های غیرایستا و تصادفی شناخته می‌شود و محدودیت‌های روش تبدیل فوریه را برطرف می‌نماید [6, 7]. کاربرد اصلی تبدیل موجک، استخراج ویژگی(Fetcher Extraction) در یک فضا است. در توصیف استخراج ویژگی می‌توان این‌گونه بیان کرد که بخش‌های مهم اطلاعات استخراج می شود و بخش‌های زاید حذف می‌گردد. با به کارگیری تبدیل موجک به‌راحتی می‌توان این فرایند استخراج ویژگی را انجام داد. هم‌چنین تبدیل موجک قابلیت آنالیز سیگنال در هر دو دامنهٔ زمانی و فرکانسی را فراهم می‌سازد.

در فرایند ارزیابی روش‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک روش‌های به‌کارگیری موجک گسسته، پیوسته و روش‌های ترکیبی مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. روش‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک گسسته اگرچه توانایی بیشتری در بررسی سیگنال‌های پرجزئیات دارد، اما امکان تشخیص آسیب با دقت بالا در این روش‌ها دشوار می‌باشد [8-10]. ازاین‌رو تعریف تابع شناسایی آسیب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. باتوجه به این محدودیت در روش‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک گسسته، تمرکز پژوهشگران بر روش‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک پیوسته به‌دلیل امکان تشخیص آسیب با دقت مناسب قرار گرفته‌است. از این روش‌ها همواره و به‌صورت گسترده در حالت منفرد و یا ترکیبی استفاده می‌شود، اما هنوز محدودیت ذاتی این روش‌ها در بررسی سیگنال‌های پرجزئیات قابل مشاهده است [11, 12]. اگرچه در بررسی سیگنال‌ها با جزئیات کم روش‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک پیوسته قابلیت مناسبی را دارند [8, 10]. به‌منظور برطرف کردن این محدودیت در روش‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک پیوسته، توسعهٔ روش‌های ترکیبی نظیر روش‌های باقی‌ماندهٔ نیرو (Wavelet Residual Force (WRF)) و روش‌های باقی‌ماندهٔ مودال (Modal Residual Force (MRF)) مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته‌است [13-15]. در این روش‌ها اگرچه بهبود نتایج مشاهده می‌شود اما نقص ذاتی در به‌کارگیری توابع تبدیل موجک پیوسته هنوز برطرف نشده‌است. این محدودیت در روش‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک پیوسته باعث افزایش زمان تحلیل در مقایسه با روش‌های مبتنی‌بر تبدیل موجک گسسته خواهد شد [13, 16].

پس از استخراج ویژگی‌های سیگنال براساس تبدیل موجک بررسی و ارزیابی داده‌ها در دو دامنهٔ زمان و فرکانس از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این بررسی امکان شناسایی آسیب در ساختار سازه فراهم می‌شود. شاخص‌های گوناگونی به‌منظور شناسایی آسیب برمبنای الگوریتم‌های مختلف شناسایی آسیب ارائه شده‌است، اما

تمامی آنها در حوزهٔ شناسایی الگوی سیگنال کاربرد مناسبی ندارد. استفاده از اطلاعات آنتروپی ضرایب تبدیل موجک یکی از شاخص‌های حساس آسیب برای تشخیص آسیب در سازه‌ها می‌باشد [17]. آنتروپی موجک، آنتروپی موجک پیش‌رونده و آنتروپی موجک نسبی و هم‌چنین توابع تفاضلی از موارد بااهمیت و قابل کاربرد می باشند [19-17].

به‌کارگیری مفهوم آنتروپی موجک از قابلیت مناسبی در شناسایی آسیب برخوردار است. یوون و همکارانش در سال ۲۰۱۱ از آنتروپی موجک به‌منظور شناسایی محل وقوع آسیب غیرمتمرکز در سنسورهای بی‌سیم استفاده کردند [16]. نوری و همکارنش در سال ۲۰۱۸ به‌منظور شناسایی آسیب از روش مبتنی‌بر تبدیل بستهٔ موجک (Wavelet Packet Transform)، در مدل عددی و آزمایشگاهی از یک سازهٔ پل فولادی استفاده کردند [20]. آن‌ها بااستفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از سنسورهای کرنش، با قابلیت اندازه‌گیری نرخ تغییرات انرژی بستهٔ موجک به شناسایی محل آسیب پرداختند.

در این مقاله، یک روش شناسایی آسیب در سازه مبتنی‌بر به‌کارگیری مفهوم آنتروپی موجک برمبنای آنالیز داده‌های تبدیل گسستهٔ موجک پیشنهاد می‌شود. درنتیجه بااستفاده از این تابع آنتروپی امکان بهره‌برداری از مزایای تبدیل گسستهٔ موجک در افزایش سرعت و توانایی بررسی سیگنال‌های پر جزئیات فراهم می‌شود. روش پیشنهادی در شناسایی نقاط آسیب‌دیده در فرایند تحلیل لرزه‌ای سازهٔ سه‌بعدی مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. در بخش بعد، جزئیات روش پیشنهادی ارائه شده‌است.

آنتروپی موجک نسبی گسسته در شناسایی آسیب

به‌منظور بهره‌برداری از ویژگی‌های تبدیل موجک گسسته در بررسی سیگنال‌های پرجزئیات با سرعت مناسب که از ویژگی‌های این روش می‌باشد، لازم است که به‌منظور افزایش کیفیت تشخیص آسیب در این روش دقت محاسبات را افزایش داد. ازاین‌رو در این بخش، جنبه‌های تئوری تبدیل موجک گسسته (Discrete Wavelet Transfer (DWT)) و جزئیات آنتروپی موجک نسبی (Relative Wavelet Entropy (RWE)) که براساس آن شناسایی آسیب در سازه مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت، ارائه می‌شود.

تبدیل موجک گسسته
(Discrete Wavelet Transfer (DWT))

تبدیل موجک توانایی آنالیز هم‌زمان چند سیگنال متغیر در دامنه‌های زمان- فرکانس یا فضا- فرکانس را فراهم می‌کند. دامنهٔ وسیع موجک‌های مادر به‌روش تبدیل موجک اجازه می‌دهد که تغییرات ظریف در یک سیگنال که تشخیص آن با روش تبدیل فوریه دشوار است به‌آسانی شناسایی شود [2]. براساس این قابلیت امکان تشخیص چند آسیب در یک سازه و در یک فرایند ارزیابی فراهم می‌شود. در این تبدیل یک سیگنال زمانی ورودی به موجک‌های گسسته تبدیل می‌شود و ضرایب موجک پایین‌گذر و بالاگذر محاسبه می‌شوند. در تبدیل موجک گسسته با درنظر گرفتن تابع موجک مادر $\Psi^{i}(2t-k)$ تجزیهٔ سیگنال ورودی انجام می‌شود. بااستفاده از فیلتر پایین‌گذر $LF(k)$ فرکانس‌های پایین و بااستفاده از فیلتر بالاگذر $HF(k)$ فرکانس‌های بالا در سیگنال ورودی تجزیه و طبقه‌بندی می‌شوند. این فیلترها به این منظور طراحی شده‌اند که تمامی اطلاعات در بازهٔ تعریف‌شده بررسی شود و دقت فرایند در مقیاس‌های مختلف کنترل شود [21].

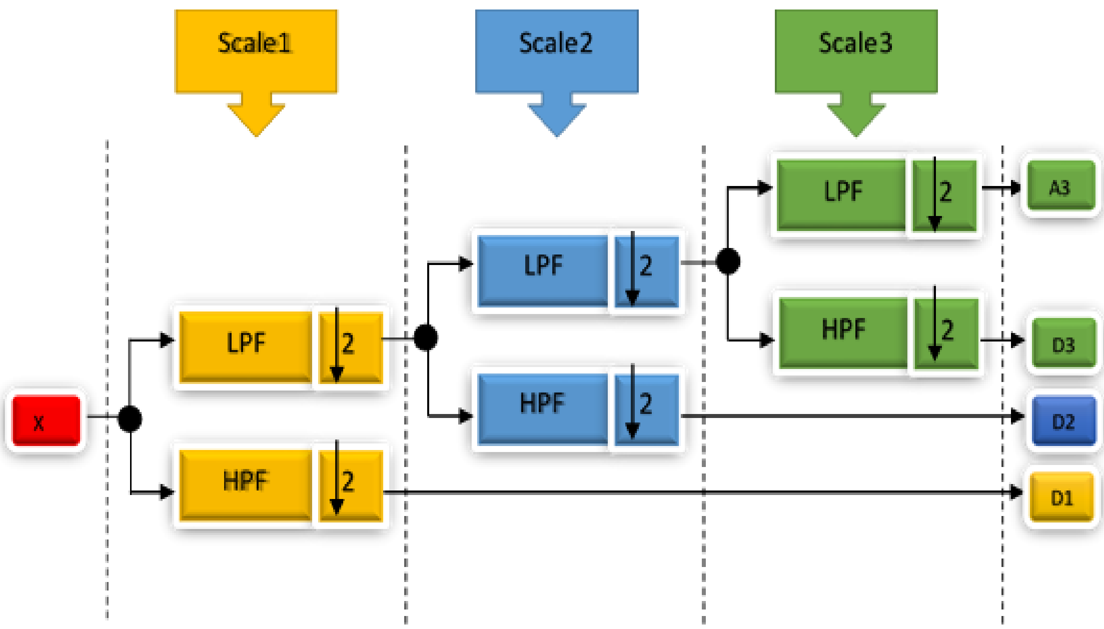
$$\Psi_{(t)}^{2i} = \sqrt{2}\sum_{k=-\infty}^{\infty} HF(k)\Psi^{i}(2t-k) \; ; \qquad (۱)$$

$$\Psi_{(t)}^{2i+1} = \sqrt{2}\sum_{k=-\infty}^{\infty} LF(k)\Psi^{i}(2t-k) \; ; \qquad (۲)$$

فرایند تبدیل موجک گسسته و دامنهٔ تغییرات در

مقیاس‌های مختلف در شکل (۱) نشان داده شده‌است. در هر سطح مقیاس یک‌بار فیلترهای تجزیهٔ موجک بر سیگنال اصلی ورودی x(t) اعمال می‌شود. در هر مرتبه از مقیاس و اعمال فیلترها، خروجی در دو دامنه شامل اطلاعات فرکانس پایین و اطلاعات فرکانس بالا طبقه‌بندی می‌شود. گروه مؤلفه‌ها شامل اطلاعات فرکانس پایین از سیگنال اصلی به‌عنوان تقریب (Approximation) می‌شود که با A نشان داده می‌شود و گروه مؤلفه‌ها شامل اطلاعات فرکانس بالا به‌منظور درنظر گرفتن جزئیات (Details) می‌شود که با D نشان داده می‌شود. مقیاس‌های بعدی تبدیل موجک گسسته باستفادهٔ پی‌درپی از فیلترهای معرفی‌شده برروی گروه جزئیات مقیاس مرحلهٔ قبل D_{i-1} اعمال می‌شود. خروجی-های مقیاس‌های بعدی نشان‌دهندهٔ گروه‌های فرکانسی به‌شدت محدود و با فرکانس‌های پایین‌تر می‌باشد. خروجی نهایی تبدیل موجک گسسته در مقیاس نهایی (n) شامل دو بخش می‌باشد. بخش اول زیرگروه فرکانس پایین تقریب A_n و بخش دوم زیرگروه‌های فرکانس بالای جزئیات در تمام مقیاس‌های (1,2,3,…n) است که با ($D_1, D_2, D_3, …, D_n$) نشان داده می‌شود. نتایج در سه مقیاس در شکل (۱) نشان داده شده‌است.

تبدیل موجک گسسته مستلزم انتخاب یک موجک مناسب و تعداد مقیاس‌های مناسب به‌منظور کسب نتیجهٔ دقیق می‌باشد. ازاین‌رو باتوجه به قابلیت شتاب‌سنج‌های ثبت‌کنندهٔ رفتار لرزهای غیرخطی و غیرایستا امکان برطرف کردن این محدودیت فراهم می‌شود. باتوجه به حساسیت این شتاب‌سنج‌ها بیشترین دقت و بیشترین انرژی در فرکانس‌های طبیعی سازه نشان داده می‌شود [2]. ازاین‌رو مقیاس کردن تا زمانی باید انجام شود که فرکانس‌های طبیعی سازه را شامل شود. درنتیجه اگر آسیب در یک سازه موجب تغییر در فرکانس طبیعی سازه شود، آن آسیب به‌عنوان تغییری در انرژی در مقیاس متناظر مشاهده خواهد شد.



شکل ۱ ساختار محاسباتی تبدیل موجک گسسته

آنتروپی موجک

همان‌گونه که در بخش پیشین ذکر شد، با اعمال n مقیاس تبدیل موجک گسسته برروی یک سیگنال ضرایب موجک گسسته در تمامی زیرگروه‌ها محاسبه می‌شوند. این ضرایب در مقیاس nام شامل آخرین تقریب (A_n) و جزئیات ($D_i; i = n, n-1, \ldots, 1$) در همهٔ مقیاس‌ها می‌باشد. هر کدام از این مقیاس‌ها را می‌توان به‌عنوان یک زیرگروه مجزا با طول متفاوت درنظر گرفت. اگر طول نمونه سیگنال ارتعاش اصلی با L تعریف شود، A_n شامل $\frac{L}{2^n}$ ضریب و ($D_i; i = n, n-1, \ldots, 1$) مقدار $\frac{L}{2^i}$ ضریب را شامل می‌شود. بردار ضرایب موجک از یک تبدیل موجک گسسته با n مقیاس را به‌صورت یک ماتریس از زیرگروه‌های مقیاس‌شده به‌ترتیب افزایش فرکانس‌ها در هر یک از زیرگروه‌ها به‌صورت $C_{ji} = [A_N, D_N, D_{N-1}, \ldots, D_1]$ می‌توان نشان داد. هر یک از بردارهای ماتریس C_{ji} دارای k ارائه می‌باشد.

انرژی سیگنال در هر گروه را که با (E_j) نشان داده می شود، از جمع مربعات ضرایب آن زیرگروه برای کل طول زیرگروه می‌توان محاسبه کرد. این انرژی که با (E) نشان داده می‌شود به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$E = [E_j] = [\sum_k |A_n(k)|^2, \sum_k |D_j(k)|^2] \qquad (۳)$$

انرژی کل در تبدیل موجک یک سیگنال به‌صورت جمع گروه را که با (E_{tot}) نشان داده می شود، در دامنهٔ زمان و دامنهٔ زیرگروه که در معادلهٔ (۳) پیشنهاد شده‌است می‌توان به‌شکل زیر نوشت:

$$E_{tot} = \sum_k |A_n(k)|^2 + \sum_{i=1}^{n} \sum_k |D_j(k)|^2 \qquad (٤)$$

نسبت انرژی موجک در زیرگروه jام را که با (P_j) نشان داده می‌شود، می‌توان به‌صورت معادلهٔ (٤) تعریف نمود:

$$P_j = \frac{E_j}{E_{tot}} \quad j = 1,2, \ldots . n \qquad (۵)$$

مقدار P_j متناظر با درصد انرژی کل در زیرگروه jام است. توزیع مقادیر $P_1, P_2, \ldots, P_N$ تا حدودی شبیه یک توزیع احتمال انرژی است، به این معنی که مجموع مقادیر P_j برابر یک می‌باشد. از آنجایی‌که نسبت انرژی موجک برای هر زیرگروه تعریف می‌شود، این مقدار یک ابزار مناسب برای نمایش و توصیف یک پدیدهٔ طبیعی است که تغییرات طیف انرژی در دامنهٔ فرکانسی را مشخص می‌کند.

رن و همکارانش در سال 2008، مفهوم آنتروپی موجک را در شناسایی آسیب استفاده کردند [17]. براساس تئوری آنتروپی Shannon، آنتروپی موجک در یک نسبت آنتروپی مشخص موجک $P_j \mathrm{Ln}[P_j]$ و مقدار کل آنتروپی (S_{WT}) به‌صورت معادله (۵) تعریف می‌شود [2].

$$S_{WT} = S_{WT}(P) = -\sum_j P_j \mathrm{Ln}[P_j] \qquad (٦)$$

می‌توان نشان داد که به‌کارگیری نسبت آنتروپی موجک در دو وضعیت سازهٔ آسیب‌دیده $P_j^{Damaged}$ و آسیب‌ندیده $P_j^{Undamaged}$ باعث بهبود دقت در شناسایی آسیب می‌شود. همان‌طور که در معادلهٔ (٦) نشان داده شده‌است.

$$RWE = -\sum_j P_j^{Damaged} \mathrm{Ln}\left(\frac{P_j^{Damaged}}{P_j^{Undamaged}}\right) \qquad (۷)$$

در یک سازهٔ آسیب ندیده نسبت انرژی موجک $P_j^{Damaged}$ و $P_j^{Undamaged}$ یکسان می باشند، درنتیجه مقدار RWE صفر خواهد شد. اما وجود آسیب سیگنال پاسخ را تا حدودی تغییر می‌دهد و در نتیجه مقدار RWE افزایش خواهد یافت.

الگوریتم خطی به‌کارگیری تابع آنتروپی معرفی‌شده در به‌کارگیری (معادلهٔ ٦) به‌منظور به‌کارگیری در تبدیل موجک گسسته به‌منظور شناسایی آسیب در جدول (۱) ارائه شده‌است. در ادامهٔ این مقاله، معیار RWE به‌منظور شناسایی مکان آسیب در تبدیل موجک گسسته بااستفاده از مدل عددی معرفی خواهد شد و توانایی روش پیشنهادی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

جدول ۱ الگوریتم تشخیص آسیب

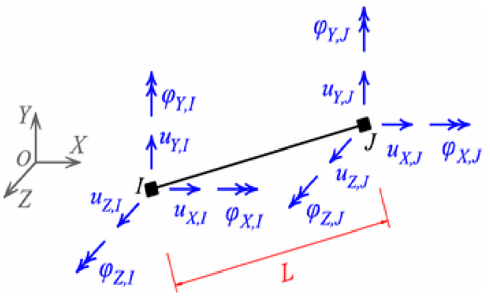
شروع
استخراج شتاب‌نگاشت در درجات آزادی مورد بررسی سازهٔ آسیب‌دیده و آسیب‌ندیده
تکرار این حلقه برای سازهٔ سالم و سازهٔ آسیب‌دیده
تکرار حلقه برای تمامی شتاب‌نگاشت در درجات آزادی مورد بررسی
شروع تشخیص آسیب
تکرار حلقه در مقیاس مورد بررسی برای n مقیاس 1, 2, …, n
محاسبهٔ بردار ضرایب A_n
محاسبهٔ بردار ضرایب $D_1, D_2, …, D_n$
محاسبهٔ توابع انرژی $E_1, E_2, …, E_n$
محاسبهٔ تابع انرژی کل E_{tot}
محاسبهٔ نسبت انرژی $P_1, P_2, …, P_n$
محاسبهٔ تابع آسیب در تمامی درجات آسیب RWE
شناسایی توابع آسیب حداکثر در درجات آزادی بررسی‌شده و تشخیص درجات آزادی آسیب‌دیده
پایان

مدل عددی سازهٔ قاب سه‌بعدی

به‌منظور ارزیابی عددی الگوریتم پیشنهادی مدل اجزای محدود سازهٔ قاب سه‌بعدی با المان‌های تیر اویلر- برنولی توسعه داده شده‌است، که قابلیت درنظر گرفتن رفتار واقعی اتصال را با درنظر گرفتن یک درجه آزادی اضافی برای هر دوران دارد [22]. در این بخش مدل عددی از یک سازهٔ قاب سه‌بعدی با شش درجه آزادی در هر گره و سه درجه آزادی اضافی به‌منظور درنظر گرفتن دوران واقعی اتصال [22] در محیط Matlab™ مدل‌سازی شده‌است و پاسخ‌ها به‌دلیل شتاب‌نگاشت اعمال‌شده به سازه در هر درجه آزادی محاسبه شده‌است. درنهایت با ایجاد سناریوهای گوناگون آسیب در اتصالات به شناسایی محل آسیب طبق روش پیشنهادی پرداخته می‌شود.

ماتریس سختی و جرم المان قاب سه‌بعدی

ماتریس سختی و جرم المان قاب سه‌بعدی را می‌توان از ترکیب رفتار المان‌های محوری، خمشی و پیچشی استخراج کرد [23]. شکل (۲) یک المان قاب سه‌بعدی مرجع را در دستگاه مختصات محلی با ۱۲ درجه آزادی نشان می‌دهد. محور x در طول خط مرکزی مقاطع عرضی و محورهای y و z محورهای اصلی در مقطع عرضی هستند. ممان اینرسی‌های مقطع عرضی I_z و I_y هستند و I_p ممان اینرسی قطبی حول محور x می‌باشد.



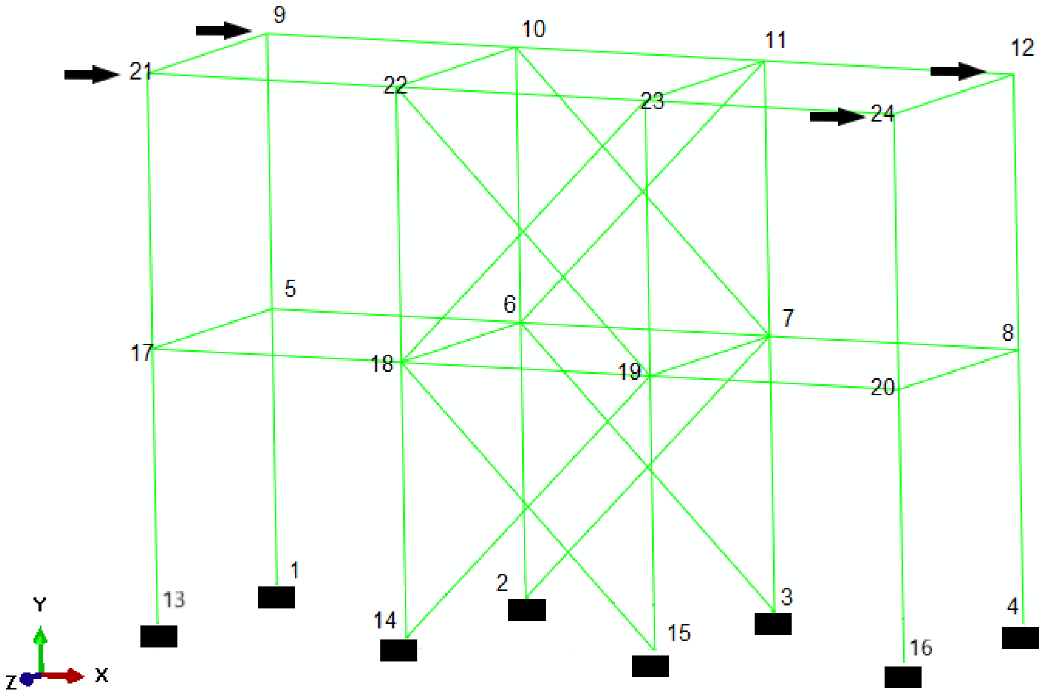
شکل ۲ یک المان قاب سه‌بعدی مرجع با مختصات محلی و درجات آزادی

ارزیابی صحت نتایج قاب سه‌بعدی مدل‌سازی‌شده

به‌منظور اطمینان از کدهای برنامه‌نویسی‌شده در محیط Matlab™ قاب سه‌بعدی، قاب با همان مشخصات در نرم‌افزار اجزای محدودی Abaqus™ مدل‌سازی شده و صحت نتایج مورد بررسی قرار گرفته‌است. به‌منظور

مقایسهٔ نتایج تحلیل دینامیک و اطمینان از صحت تحلیل، فرکانس‌های طبیعی سازه با یکدیگر مقایسه شده‌است. به این منظور قاب سه‌بعدی شکل (۳) با ۸ المان دارای سطح مقطع دایرهٔ تو خالی در نرم‌افزار Abaqus™ مدل‌سازی شده و تحلیل فرکانسی انجام شده‌است. مشخصات مصالح و هندسهٔ اعضا در هر دو مدل Matlab™ و Abaqus™ در جدول (۲) و جدول (۳) ارائه شده‌است.

در جدول (٤) فرکانس‌های طبیعی مدل شبیه‌سازی‌شده در محیط Matlab™ به‌همراه درصد خطا نسبت‌به مدل شبیه‌سازی‌شده در نرم‌افزار Abaqus™ ارائه شده‌است. درصد خطای کم نشان از توانایی محاسبهٔ الگوریتم پیشنهادی دارد.

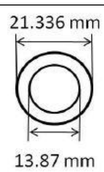


شکل ۳ مدل سازهٔ خرپایی و شماره‌گذاری محل گره‌ها

جدول ۲ مشخصات مصالح مدل سازه

تعداد مصالح	مدول الاستیسیته Pa	مدول برشی Pa	چگالی $\frac{kg}{m^3}$	ضریب پواسون
1	2.00E11	7.69E10	7850	0.3

جدول ۳ مشخصات هندسهٔ مدل سازه

تعداد مقطع	نوع مقطع	شکل مقطع	مساحت m^2	ممان انرسی m^4	ممان انرسی قطبی m^4
1	دایرهٔ تو خالی		2.06E-04	8.36E-09	1.67E08

جدول ٤ درصد خطای محاسباتی فرکانس‌های طبیعی مدل در محیط Matlab™ و Abaqus™

	Mod1	Mod2	Mod3	Mod4	Mod5	Mod6
Abaqus™	١,٢٨٥٢	١,٢٨٥٢	١,٦٤٣٨	٢,٨١٨٨	٥,٤١٤٤	٦,٤٦٢٩
Matlab™	١,٢٨٨٧	١,٢٨٨٧	١,٦٤٨١	٢,٨٢٥٦	٥,٤٢١٢	٦,٤٧١١
Eror٪	٠,٢٧٨٧	٠,٢٧٨٧	٠,٢٦٢٦	٠,٢٤١٦	٠,١٢٧٣	٠,١٢٦٩

مدل عددی

مدل عددی از سازهٔ قاب سه‌بعدی شکل (٣) با مشخصات هندسه و مصالحی که در جدول (٢) و (٣) ارائه شده‌است به‌منظور بررسی الگوریتم پیشنهادی، در محیط Matlab™ مدل‌سازی و مورد بررسی قرار گرفته‌است. این مدل دارای ٥٤ المان و ٢٤ گره است. هر المان دارای دو گره و هر گره دارای ٦ درجه آزادی می‌باشد (٣ درجه انتقالی و ٣ درجه دورانی). در مدل قاب سه‌بعدی گره‌های ١، ٢، ٣، ٤، ١٣، ١٤، ١٥، ١٦ در هر ٦ درجه آزادی محدود شده‌اند، و این گره‌ها به‌عنوان شرایط مرزی تکیه‌گاهی درنظر گرفته می‌شوند. نتایج پاسخ شتاب حاصل از بارگذاری در هر درجه آزادی با ایجاد سناریوهای آسیب که در بخش بعدی توضیح داده می‌شود محاسبه شده-است.

با به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادشده، پاسخ شتاب‌نگاشت در سازهٔ آسیب‌دیده و آسیب‌ندیده براساس سناریوهای آسیب مورد مقایسه قرار می‌گیرد و توانایی الگوریتم پیشنهادی در شناسایی محل آسیب مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

شبیه‌سازی آسیب با اعمال نویزهای تصادفی

به‌دلیل محدودیت و اطمینان در شبیه‌سازی حرکات غیرخطی ناشی از عوامل مخالف نظیر آسیب و رفتار غیرخطی هندسی و مواد در اعضای سازه و اتصالات می‌توان از اعمال تغییرات در ضرایب استفاده کرد، اما به‌منظور اطمینان از لحاظ کردن این اثرات برای ایجاد آسیب در مدل عددی نیاز به انتخاب روش مناسب در مدل‌سازی می‌باشد. از این‌رو از روش اعمال نویزهای تصادفی ناهم‌بسته با نسبت سیگنال به نویز(Signal-to-Noise Ratio(SNR)) 1dB و 100dB استفاده می‌شود [24]. به‌کارگیری این دامنهٔ نویز نمایشگر دقت روش می‌باشد و نتایج آزمایشگاهی صحت روش افزودن نویز تصادفی به‌منظور شبیه‌سازی آسیب در بررسی سیگنال-های غیرایستا و غیرخطی ناشی از آسیب را مورد تأیید قرار می‌دهند [25].

سناریوهای ارزیابی‌شده

به‌منظور نمایش توانایی روش شناسایی آسیب مبتنی‌بر الگوریتم پیشنهادی، درمجموع چهار سناریوی آسیب در این مقاله ارائه می‌شود. جزئیات هر یک از این سناریوها در جدول (٥) و (٦) ارائه شده‌است. در تمامی سناریو-های آسیب، همهٔ المان‌های مرتبط با گره آسیب‌دیده درنظر گرفته می‌شوند، اگرچه امکان آسیب تنها در یک درجه آزادی مربوط به هر المان نیز وجود دارد.

جدول ٥ سناریوهای آسیب روش محلی‌سازی آسیب براساس شاخص آسیب اعمال ١ آسیب و بررسی سیگنال در ٤ گره

سناریوی آسیب	محل آسیب	گره‌های مورد بررسی	توضیحات
SD1	١٨	١٧-١٨-١٩-٢٠	گره‌های مورد بررسی در یک امتداد
SD2	٦	٦-١٠-١٩-٢٣	گره‌های مورد بررسی تصادفی
SD3	٥	١٧-١٨-١٩-٢٠	گره آسیب دیده خارج از سناریو

جدول ٦ سناریوهای آسیب روش محلی‌سازی آسیب براساس شاخص آسیب اعمال ۲ آسیب و بررسی سیگنال در ۸ گره

سناریوی آسیب	محل آسیب	گره‌های مورد بررسی	توضیحات
DD1	۱۱و ۱۸	٦-۷-۱۰-۱۱- ۱۸-۱۹-۲۲-۲۳	افزایش مکان‌های مورد بررسی- دو آسیب

در سناریوی آسیب SD_1 (تک آسیب ۱) ، همهٔ مکان‌های مورد بررسی در یک امتداد پشت سرهم قرار دارند، و آسیب تنها در یک مکان درنظر گرفته شده‌است. این سناریو ابتدایی‌ترین سناریو از لحاظ سادگی و کارایی در بررسی مفاصل با فاصلهٔ نزدیک به یکدیگر و المان‌های مشترک متصل به یک گره طراحی شده‌است. میزان آنتروپی این گره‌های مجاور، یکدیگر را تحت پوشش قرار می‌دهند و بر یکدیگر اثرگذار هستند از این‌رو می‌تواند باعث ایجاد انحراف در شناسایی آسیب شود. در این سناریو به بررسی تداخل آنتروپی مکان آسیب و مکان‌های آسیب‌ندیده در روند استفاده از الگوریتم پرداخته شده‌است.

در سناریوی SD_2 (تک آسیب ۲)، مکان‌های مورد بررسی به‌صورت تصادفی توزیع شده‌اند. در این سناریو تلاش شده‌است که نقاط مورد ارزیابی با فاصله از یکدیگر قرار داشته باشند تا ضمن بررسی و مقایسهٔ آنتروپی در نقاط تصادفی، فاصلهٔ ایجادشده بین نقاط مورد ارزیابی از تداخل اثرات آنتروپی در گره‌ها جلوگیری کند تا الگوریتم پیشنهادی از این نظر نیز مورد ارزیابی قرار گیرد. تصادفی انتخاب شدن نقاط مورد ارزیابی شرایط واقعی در ارزیابی و شناسایی آسیب در یک سازهٔ واقعی را شبیه‌سازی می‌نماید. ازاین‌رو در این سناریو امکان ارزیابی توانایی الگوریتم پیشنهادی در ارزیابی و شناسایی آسیب در یک سازهٔ واقعی نیز فراهم می‌شود.

در سومین ارزیابی، سناریوی آسیب SD_3 (تک آسیب ۳)، همهٔ مکان‌های مورد بررسی به‌صورت تصادفی توزیع شده‌اند، اما مکان آسیب در مجموعه نقاط مورد ارزیابی در این سناریو نیست. هدف از سناریوی آسیب SD_3 بررسی موضعی بودن الگوریتم پیشنهادی است. با بررسی سطح آنتروپی گره‌های انتخاب‌شده توانایی و دقت الگوریتم در عدم تشخیص اشتباه ارزیابی می‌شود.

درنهایت به‌منظور حساسیت‌سنجی و بررسی دقیق‌تر الگوریتم پیشنهادی تعداد گره‌های مورد بررسی به هشت گره افزایش یافته‌است. بر این اساس امکان نمایش قدرتمندی الگوریتم پیشنهادی در بررسی گستردهٔ مکان-های آسیب‌دیده فراهم می‌گردد. به این منظور سناریوی دو آسیب DD_1 (دو آسیب ۱) نیز مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. ذکر این نکته مهم است که در سازه‌هایی با آسیب‌دیدگی گسترده، به‌منظور بررسی دقیق چند آسیب‌دیدگی، تعداد مکان‌های مورد بررسی لازم است که افزایش یابد تا تمام مکان‌های آسیب‌دیده تحت پوشش قرار گیرد. این سناریو امکان‌پذیری استفاده از الگوریتم پیشنهادی را به‌منظور درنظر گرفتن شرایط واقعی در ارزیابی و شناسایی بیش از یک آسیب در یک سازه، شبیه‌سازی می‌کند.

نتایج و بحث‌ها

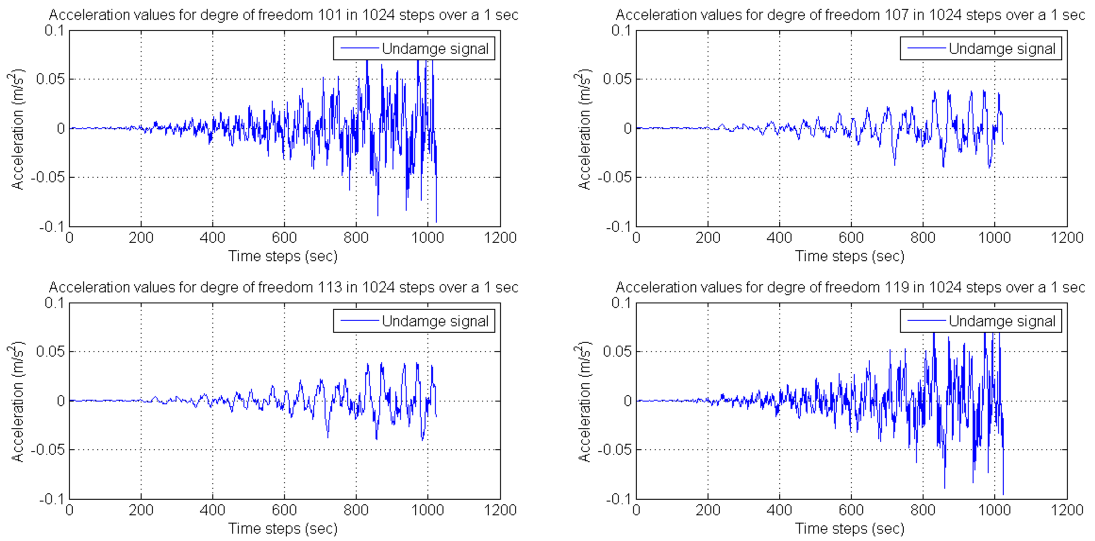
در این بخش به بررسی نتایج حاصل از به‌کارگیری الگوریتم پیشنهادی در بررسی سناریوهای آسیب SD_1, SD_2, SD_3, DD_1 پرداخته می‌شود و کارایی روش پیشنهادی در شناسایی آسیب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

بررسی نتایج شبیه‌سازی آسیب در سناریوی آسیب SD_1

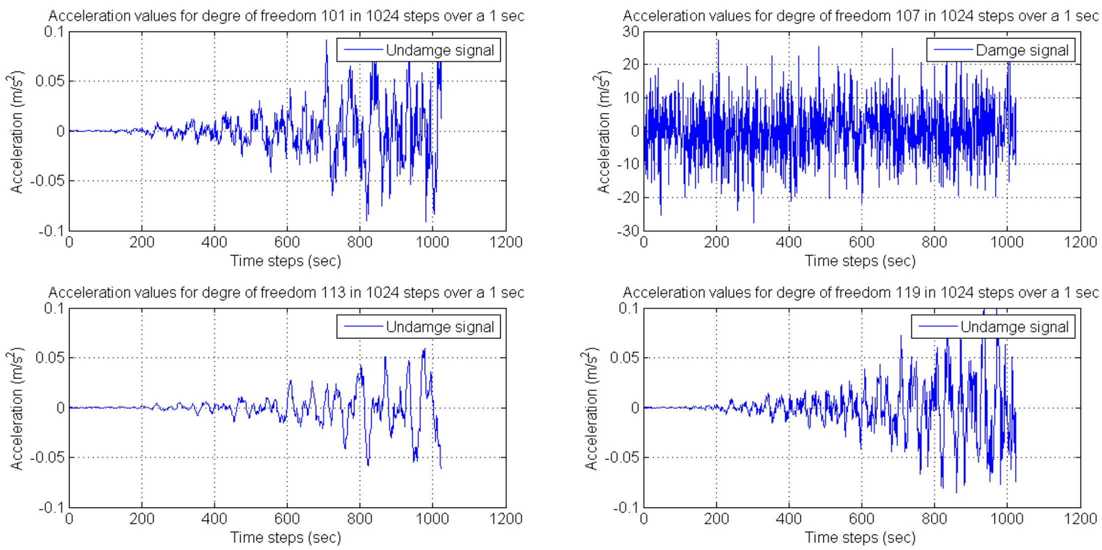
در شکل (٤) اثر اعمال نویز تصادفی به‌منظور شبیه‌سازی آسیب برروی سیگنال‌های حاصل از درجه آزادی *۵m* در چهار گره در سناریوی آسیب SD_1 ارائه شده‌است. پس از اعمال نویز تصادفی، نوسانات به‌وجودآمده در سیگنال درجه آزادی ۱۰۷ به‌صورت کاملا محسوس قابل مشاهده است (شکل٤- ب). به‌راحتی می‌توان دگرگونی و نوسانات شدید سیگنال درجه آزادی گره مورد نظر را پیش از اعمال نویز و پس از اعمال نویز مشاهده کرد. درحالی‌که شناسایی نوسانات با شدت کمتر نیاز به تحلیل

دقیق داده‌ها دارد.

درواقع این شبیه‌سازی بخشی از پدیده‌ای است که برروی یک درجه آزادی سازه پس از وقوع هر نوع آسیبی به‌وجود می‌آید. هم‌چنین ممکن است آسیب مورد نظر به تمام درجات آزادی سازه اثر کند و باعث ایجاد نوسانات شدید در دیگر درجات آزادی سازه شود. اما در این بخش به‌منظور ساده‌سازی، نتایج مربوط به اعمال آسیب در یک درجه آزادی ارائه شده‌است تا این اثر به‌روشنی در شکل (٤) و (٥- الف) مشاهده شود. این نوسانات ناشی از آسیب باعث افزایش مقدار آنتروپی در درجه آزادی آسیب‌دیده می‌شود. تشخیص افزایش مقدار آنتروپی براساس الگوریتم پیشنهادی در هر درجه آزادی ابزار شناسایی مکان آسیب خواهد بود.

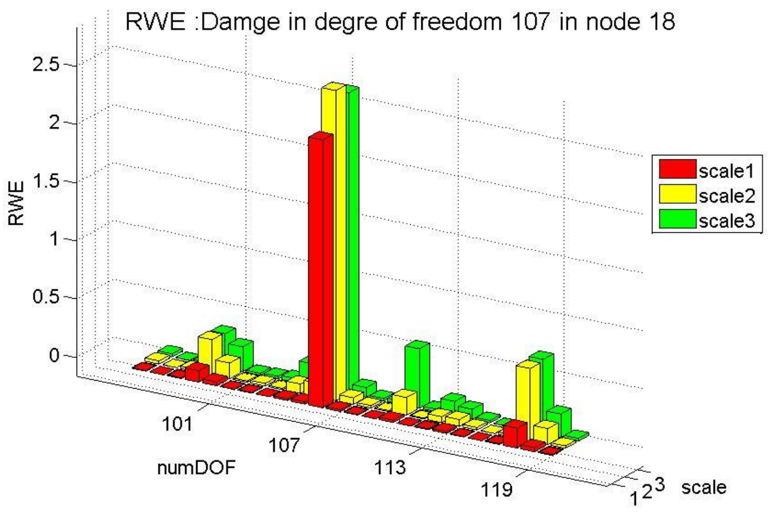


(الف) سیگنال‌های شتاب درجهٔ آزادی ۵ام در هر گره در سناریوی آسیب SD1 پیش از اعمال نویز

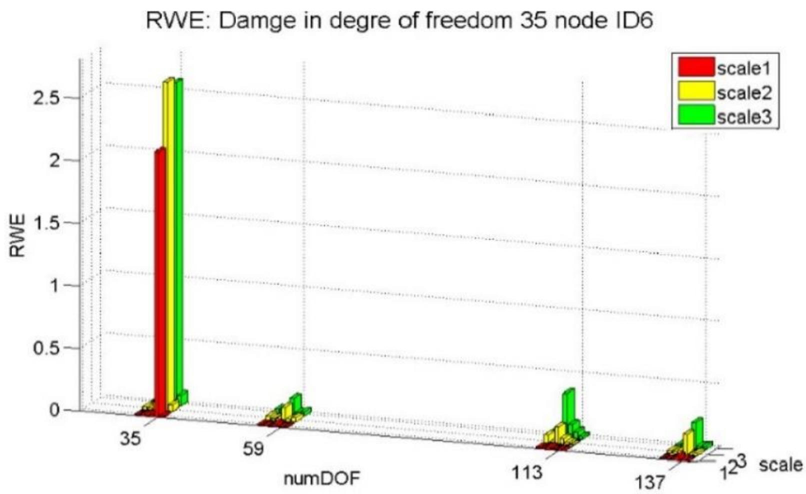


(ب) سیگنال‌های شتاب درجهٔ آزادی ۵ام در هر گره در سناریوی آسیب SD1 پس از اعمال نویز

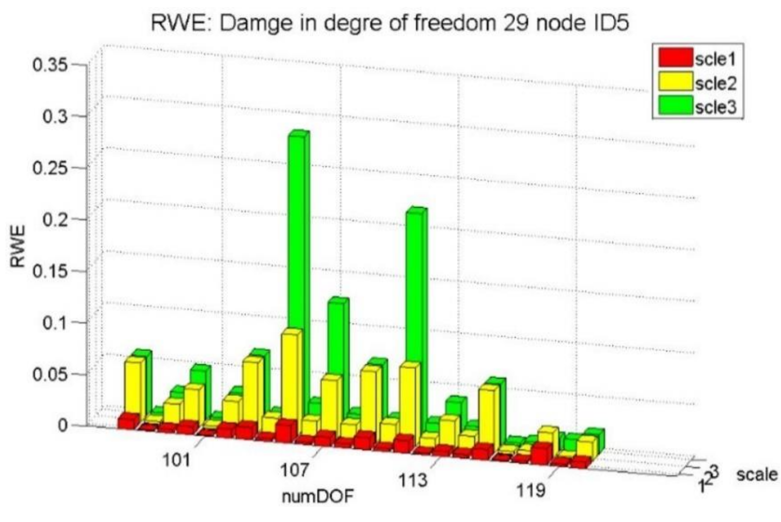
شکل ٤ سیگنال‌های شتاب درجهٔ آزادی ۵ام در هر گره در سناریوی آسیب SD1



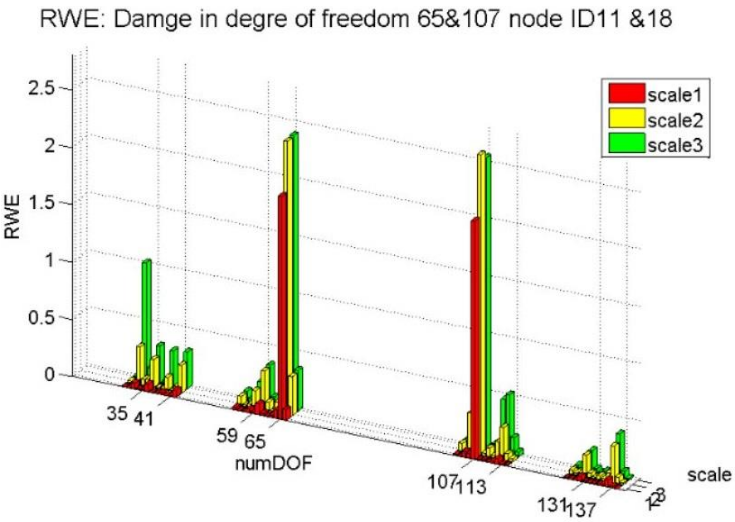
(الف) مقدار شاخص‌های آسیب براساس روش پیشنهادی در سناریوی آسیب SD1



(ب) مقدار شاخص‌های آسیب براساس روش پیشنهادی در سناریوی آسیب SD2



(پ) مقدار شاخص‌های آسیب براساس روش پیشنهادی در سناریوی آسیب SD3



(ت) مقدار شاخص‌های آسیب براساس روش پیشنهادی در سناریوی آسیب DD1

شکل ۵ مقدار شاخص‌های آسیب براساس روش پیشنهادی در چهار سناریوی آسیب

ارزیابی نتایج آماری از شناسایی آسیب بااستفاده از روش شاخص آسیب

به‌منظور ارزیابی روش پیشنهادشده، سناریوهای آسیب متفاوتی درنظر گرفته شده‌است و تنها نتایج مربوط به چهار سناریوی معرفی شده در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته‌است. مقدار تغییرات در شاخص آسیب معرفی‌شده برای تبدیل موجک گسستهٔ معرفی شده در شکل (۵) نشان داده شده‌است. افزایش شدید در شاخص آسیب در مکان آسیب به‌سادگی و تنها در سه مقیاس قابل مشاهده است. ازاین‌رو براساس تبدیل موجک گسسته از این شاخص می‌توان آن را به‌عنوان یک شاخص مؤثر در روش شناسایی آسیب درنظر گرفت (شکل ۵– الف).

همان‌گونه که در شکل (۵– ب) مربوط به نتایج ارزیابی برمبنای سناریوی آسیب SD_2 مشخص است، هنگامی‌که مکان‌های مورد بررسی به‌صورت تصادفی توزیع شده‌اند امکان شناسایی آسیب وجود دارد. پس با توزیع متفاوت محل‌های مورد بررسی نیز الگوریتم پیشنهادی توانایی شناسایی محل آسیب‌دیده را دارد. این قابلیت نشان می‌دهد که نیاز به گزینش مکان مورد بررسی وجود ندارد. این قابلیت در فرایند عملی ارزیابی آسیب در سازه نقش بسیار مؤثری را دارد.

در شکل (۵– پ) نتایج ارزیابی سناریوی آسیب SD_3 نشان داده شده‌است. هنگامی‌که همهٔ مکان‌های مورد بررسی در درجات آزادی سالم قرار دارد تفاوت برجسته‌ای در مقدار شاخص آسیب مشاهده نمی‌شود. ازاین‌رو می‌توان حساسیت خوب شاخص در عملکرد موضعی الگوریتم پیشنهادشده را به‌عنوان یک قابلیت مهم برشمارد. این دقت در شناسایی آسیب فقط در محل آسیب‌دیده را می‌توان به‌عنوان یک قابلیت مهم برشمرد. همان‌طور که در شکل (۵– پ) مشخص است مقدار شاخص آسیب تا سه مقیاس در گره‌های مورد بررسی بسیار ناچیز است. اما با این وجود مقدار آنتروپی در مجاورت آسیب اندکی بیشتر می‌باشد که می‌تواند راهنمای مناسبی در انتخاب نقاط مورد بررسی در مراحل بعدی ارزیابی مورد توجه قرار گیرد. این قابلیت در فرایند عملی ارزیابی آسیب در سازه نقش بسیار مؤثری دارد.

در سناریوی آسیب دوگانه DD_1 که نتایج آن در شکل (۵–ت) نشان داده شده‌است، با افزایش تعداد مکان های مورد بررسی و افزایش تعداد مکان های آسیب‌دیده، شاخص شناسایی آسیب توانایی تشخیص محل آسیب‌دیده را دارد.

همان‌گونه که از نتایج عددی به‌روشنی قابل مشاهده است، روش شناسایی آسیب پیشنهاد شده در شناسایی مکان‌های آسیب و به‌صورت دقیق درجه آزادی آسیب‌دیده به‌گونهٔ مؤثری و تنها در سه مقیاس عمل می‌کند. این قابلیت در فرایند عملی ارزیابی آسیب در سازه نقش بسیار مؤثری دارد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش شناسایی آسیب براساس آنتروپی موجک برمبنای تبدیل موجک گسسته پیشنهاد شده‌است. به‌منظور نمایش کارایی شاخص آسیب معرفی‌شده برای این تبدیل موجک، کارایی الگوریتم پیشنهادی در مدل سازهٔ سه‌بعدی نمایش داده شد. امکان استفاده از این الگوریتم در سناریوهای دیگر آسیب نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است و آسیب به‌صورت صحیح شناسایی شده‌است.

نتایج به‌کارگیری این روش شناسایی را به صورت زیر می‌توان خلاصه کرد:

۱. الگوریتم و شاخص پیشنهادی، توانایی شناسایی دقیق مکان آسیب را داراست.

۲. در هر یک از نمونه‌های تکی و چندگانهٔ آسیب، همهٔ درجات آسیب‌دیده می‌تواند به‌طور موفقیت‌آمیز در هر سناریوی آسیب شناسایی شوند.

۳. شاخص آنتروپی پیشنهادشده در درجات آزادی سالم تحت تأثیر وجود آسیب در درجات آزادی مجاور قرار نمی‌گیرد، اما تغییرات می‌توانند راهنمای مناسبی برای مراحل بعدی ارزیابی باشند.

باتوجه به این‌که یکی از مزایای استفاده از تبدیل موجک گسسته، محاسبات کمتر نسبت به تبدیل فوریه سریع (Fast Fourier Transform(FFT)) می‌باشد [2]، بنابراین به‌ارگیری مفهوم آنتروپی موجک در فرایند تبدیل موجک گسسته باعث بهبود فرایند شناسایی آسیب خواهد شد. این قابلیت‌ها در فرایند عملی ارزیابی آسیب در سازه نقش بسیار مؤثری را دارد. لازم به ذکر است که ارزیابی سرعت شناسایی پس از ارزیابی دقت مورد بررسی قرار خواهد گرفت. هم‌چنین ارزیابی تنها با آسیب سیگنال‌های ارتعاشی در این مقاله انجام شده‌است، روش پیشنهادی شایستهٔ ارزیابی به‌منظور انواع دیگر از آسیب و سازه به‌صورت عددی و آزمایشگاهی می‌باشد.

مراجع

1. Saadat, S.,"Structural Health Monitoring and Detection of Progressive and Existing Damage Using Artificial Neural Networks-Based System Identification", Ph.D. Thesis, NC State University Libraries, (2003).
2. Lee, G.,"Hybrid Damage Identification Based on Wavelet Transform and Finite Element Model Updating", Ph.D. Thesis, University of Akron, (2012).
3. Biglari, A., and Ashurzade, M.,"Damage Detection for Structures by Relative Wavelet Entropy Method", *Proceedings of The 2nd International Conference on Civil Engineering*, Architechtcer and Urban Management, Vol. 1, pp. 1-11, Iran, (2019).
4. Diao, Y., Zhang, X., Sun, Z., Guo, K. and Wang, Y.,"Wavelet Entropy Based Structural Damage Identification Under Seismic Excitation", Smart Materials and Structures, Vol. 27, pp. 1-11, (2018).
5. Ravanfar, S. A., "Vibration-Based Structural Damage Detection and System Identification Using Wavelet Multiresolution Analysis", Ph.D. Thesis, University Of Malaya, (2017).

6. Sifuzzaman, M., Islam, M. and Ali, M.,"Application of Wavelet Transform and Its Advantages Compared to Fourier Transfor", *Journal of Physical Sciences*, Vol. 13, pp. 121-134, (2009).
7. Kankanamge, L.,"Application of Wavelet Transform in Structural Health Monitoring", Master's Theses, Western Michigan University, (2016).
8. Balili, C.C., Sobrepena, M. C. C., and Naval, P. C.,"Classification of Heart Sounds Using Discrete and Continuous Wavelet Transform and Random Forests", *3_{rd} IAPR Asian Conference on Pattern Recognition (ACPR)*, Kuala Lumpur, Vol. 1, pp. 655-659, (2015).
9. Chakrabarti, C., and Vishwanath, M.,"Efficient Realizations of the Discrete and Continuous Wavelet Transforms: From Single Chip Implementations to Mappings on Simd Array Computers", *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol. 43, No. 3, pp. 759-771, (1995).
10. Rioul, O., and Duhamel, P.,"Fast Algorithms for Discrete and Continuous Wavelet Transforms", *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 38, No. 2, pp. 569-586, (1992).
11. Kankanamge, Y, Hu, Y., and Shao, X.,"Application of Wavelet Transform in Structural Health Monitoring", *Earthq. Eng.* Eng. Vib. Vol. 19, pp. 515–532, (2020).
12. Barbosh, M., Singh, P., and Sadhu, A.,"Empirical Mode Decomposition and Its Variants: A Review With Applications in Structural Health Monitoring", *Smart Materials and Structures*, Vol. 29,pp. 1-20, (2020).
13. Zare, H. A., Ghodrati, A. G., and Razzaghi, S. A.,"A New Damage Index for Structural Damage Identification by means of Wavelet Residual Force", *International Journal of Optimization In Civil Engineering*, Vol. 2, pp. 269-286, (2016).
14. Yanab, G., Dong, Z., Jinping, D., and De Stefano, O.,"Structural Damage Detection Using Residual Forces Based on Wavelet Transform", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 24, pp. 224-239, (2010).
15. Silva, A., Zarzo, A., Manue, J., González, M., Manue, J., and Guijosa, M.,"Early Fault Detection of Single-Point Rub in Gas Turbines with Accelerometers on the Casing Based on Continuous Wavelet Transform", *Journal of Sound andVibration*, Vol. 487, pp. 1-21, (2020).
16. Yun, G.J., Lee, S.G., Carletta, J., and Nagayama, T.,"Decentralized Damage Identification Using Wavelet Signal Analysis Embedded on Wireless Smart Sensors", *Engineering Structures*, Vol. 33, pp. 2162-2172, (2011).
17. Ren, W.X., and Sun, Z. S.,"Structural Damage Identification by Using Wavelet Entropy", *Engineering Structures*, Vol. 30, pp. 2840-2849, (2008).
18. Pakrashi, V., O'connor, A., and Basu, B.,"A Study on the Effects of Damage Models and Wavelet Bases for Damage Identification and Calibration in Beams", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 22, pp. 555-569, (2007).

19. Poudel, U.P., Fu, G., and Ye, J.,"Wavelet Transformation of Mode Shape Difference Function for Structural Damage Location Identification", *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 36, pp. 1089-1107, (2007).
20. Noori, M., Wang, H., Altabey, W.A., and Silik, A.I.H.,"A Modified Wavelet Energy Rate-Based Damage Identification Method for Steel Bridges", *Scientia Iranica*, Vol. 25, pp. 3210-3230, (2018).
21. Biglari, A., Harrison, P. and Bićanić, N.,"Quasi-Hinge Beam Element Implemented within the Hybrid Force-Based Method", *Computers & Structures*, Vol. 137, pp. 31-46, (2014).
22. Stark, H.G.,"Continuous Wavelet Transform and Continuous Multiscale Analysis", *Journal of Mathematical Analysis and Applications,* Vol. 169, pp. 179-196, (1992).
23. Craig, R.R., and Kurdila, A.J.,"Fundamentals of Structural Dynamics", John Wiley & Sons, (2006).
24. Ibrahim, R., and Pettit, C.,"Uncertainties and Dynamic Problems of Bolted Joints and Other Fasteners", *Journal of Sound and Vibration,* Vol. 279, pp. 857-936, (2005).
25. Lee, S.G., Yun, G.J., and Shang, S.,"Reference-Free Damage Detection for Truss Bridge Structures by Continuous Relative Wavelet Entropy Method", *Structural Health Monitoring,* Vol. 13, pp. 307-320, (2014).